

УДК 681.513 : 620.1

Д.Ю.ЗУБЕНКО, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Рассматривается задача построения математической модели электромеханической системы электропоездов с тяговыми асинхронными двигателями, приводятся их модели и результаты исследований с учетом технико-эксплуатационных условий функционирования и разной степени загрузки.

Стратегической целью государственной политики Украины в развитии городского электрического транспорта является создание конкурентоспособного рельсового электроподвижного состава для удовлетворения постоянно возрастающих потребностей населения города в качественных и надежных перевозках. Создаются пробные образцы современного рельсового транспорта для городских перевозок пассажиров с электрической передачей переменного тока, в которой использованы тяговые асинхронные двигатели (ТАД), преобразователи частоты (ПЧ) и микропроцессорное управление. Проводимые испытания показывают, что тяговый асинхронный электропривод (ТАЭП) имеет перспективу, особенно при создании скоростного электропоезда, поскольку при одинаковой мощности тяговых агрегатов, напряжении питания и ряда других параметров ТАЭП обладает лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с приводами на постоянном токе. Для исследований статических и динамических характеристик проектируемых элементов и систем электропоезда можно успешно применять метод математического моделирования и идентификации.

При исследовании энергетической системы электропоезда с тяговым асинхронным электроприводом возникает ряд вопросов, связанных с моделированием ее компонентов и системы, таких, как блока синхронный генератор-выпрямитель, преобразователей частоты, тяговых асинхронных двигателей, элементов электромеханической части электропривода и нагрузки. Вопросам разработки математических моделей и исследованиям с их помощью как отдельных компонентов электропередачи электропоездов (метро), так и их систем управления посвящено большое число публикаций [5, 6]. Однако, предлагаемые модели довольно сложны и требуют значительных затрат машинного времени и времени для проведения многовариантных исследований, возникающих в процессе проектирования систем.

Целью данной работы является создание моделей электропоезда (метро) с тяговым асинхронным электроприводом и на их основе проведение исследований с целью определения структуры, параметров электропередачи и технических требований к компонентам проектируемой системы: силовому агрегату, электроприводу, тяговым двигателям, элементам механической части электропривода [1, 2].

Модель электропоезда в простейшем случае можно представить уравнением движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_C, \quad (1)$$

где $\omega = \frac{v}{R_K}$; $J = m R_K^2$; M_T – момент тяги электропоезда; M_C – момент сопротивления движению; J – момент инерции; ω – угловая скорость; v – скорость движения электропоезда; R_K – радиус колеса; m – масса груженого состава.

Момент тяги электропоезда (без учета процессов буксования) определяется количеством (n) используемых на реализацию силы тяги электродвигателей, их характеристиками, определяющими формирование электромагнитного момента, передаточным числом редуктора. Для определения значения электромагнитного момента тягового электродвигателя можно воспользоваться системой дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ТАД [4-8] или экспериментальными характеристиками двигателя.

Скорость электропоезда с учетом используемой единицы измерения в правилах производства тяговых расчетов (ППТР) (км/ч) определяется соотношением

$$V = 3,6 \omega R_K. \quad (2)$$

Определение момента тяги M_T в процессе движения электропоезда осуществляется согласно уравнениям:

$$M_T = F_T(V) R_K; \quad (3)$$

$$F_m = G_H [102 (1 + \gamma) a_m + W_0]; \quad (4)$$

$$G_H = 9,81 m, \quad (5)$$

где $F_T(V)$ – внешняя характеристика электропривода; F_m – максимальное усилие при разгоне; G_H – вес груженого состава; $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся масс ($\gamma = 0,1$); a_m – максимальное ускорение; W_0 – коэффициент сопротивления движению (при разгоне $W_0 = 1,1$).

Определение момента сопротивления M_C в процессе движения электропоезда осуществляется согласно уравнениям:

$$M_C = i R_K W_0 G_H, \quad (6)$$

$$W_0 = 1,1 + 0,012 V + 0,00025 V^2, \quad (7)$$

где i – коэффициент уклона пути (для горизонтального участка $i = 1$); V – скорость электропоезда.

Характеристики электропривода (значение силы тяги на различных позициях контроллера водителя, соответствующие значения скорости метро, КПД, реализуемая мощность электропередачи, тяговый момент, приведенный к колесной паре) с учетом мощности собственных нужд (P_{CH}) приведены в табл.1.

Таблица 1 – Основные характеристики привода при $P_{CH} = 0$ кВт

Тяга, т	Скорость, км/ч	КПД, %	Мощность, кВт	Момент, Нм
7,6	19,5	81,2	206,6	4727
5,4	28,6	83,5	213,0	3323
3,55	44,0	84,8	217,4	2205
2,3	68,7	84,5	217,8	1412
1,5	103,0	83,8	217,0	938
1,2	130,0	83,1	216,2	738

В результате идентификации получены зависимости силы тяги 8-вагонного электропоезда при различном количестве тяговых двигателей соответствующей мощности. На рис.1 приведена внешняя тяговая характеристика электропривода для случая использования 16-тяговых электродвигателей ($n = 16$).

Аналогичные статические тяговые характеристики получены для электропривода, включающего 8 или 20 тяговых двигателей. Число двигателей $n = 8$ взято для варианта трамвая и $n = 20$ – для работы трамвая в режиме электропоезда [7].

Структурная схема модели для определения скорости электропоезда в зависимости от параметров электропривода и условий движения приведена на рис.2. Она состоит из следующих элементов: блока вычисления момента тяги состава M_T ; блока вычисления момента сопротивления движению M_C ; блока вычисления коэффициента K ; блока интегрирования (оператор $1/p$). Коэффициент K определяется как:

$$K = \frac{3,6}{m R_K}.$$

Функциональные схемы моделей блоков вычисления момента тяги электродвигателя, момента сопротивления движению электропоез-

да, скорости электропоезда согласно соотношениям (1)-(7) приведены соответственно на рис.3-5.

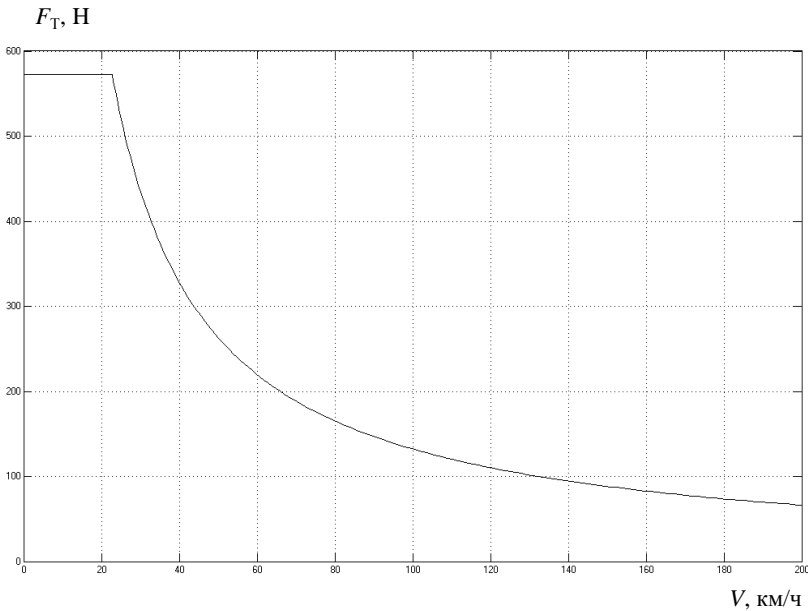


Рис.1 – Внешняя тяговая характеристика электропривода

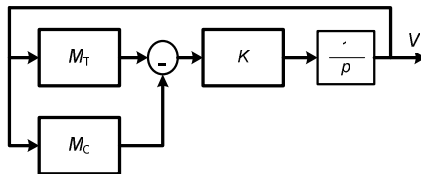


Рис.2 – Структурная схема модели

В процессе исследований динамики электропоезда рассматривали влияние изменения параметров электропоезда, таких как загруженность состава, сила тяги и величина удельного сопротивления движению. Загруженность подвижного состава моделировали путем изменения количества пассажиров. При этом изменение их количества рассматривали по отношению к расчетному как в сторону увеличения (+25%, +50%), так и в сторону уменьшения (–25%, –50%).

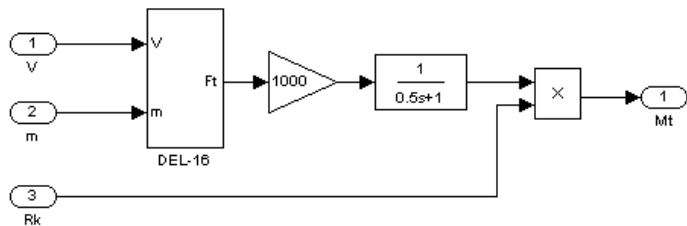


Рис.3 – Функциональная схема машинной модели блока вычисления момента тяги электродвигателя

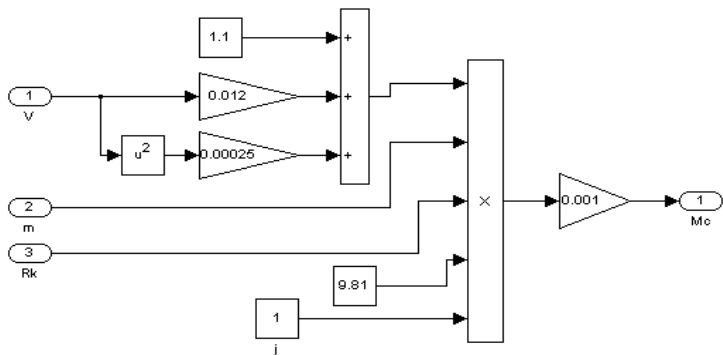


Рис.4 – Функциональная схема модели блока вычисления момента сопротивления движению электропоезда

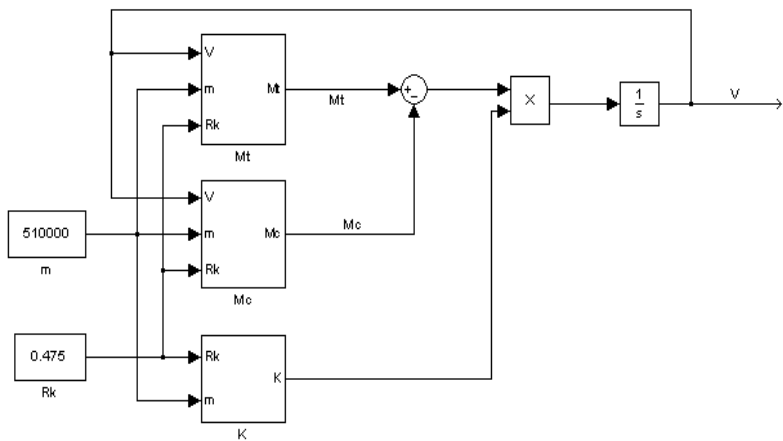


Рис.5 – Функциональная схема модели вычисления скорости электропоезда

Изменение силы тяги, что соответствует возможному изменению напряжения контактной сети, моделировали путем изменения силы тяги по отношению к расчетному значению аналогично загруженности электропоезда. Соответствующие данные для одного из вариантов структуры электропоезда приведены в табл.2.

Таблица 2 – Результаты исследований при ($n = 20$, $\mu = 2.26$, $P_{дв} = 270$ кВт)

№ п/п	Исследуемый параметр	Значение параметра	Время разгона до 200 км/ч, с	Среднее ускорение до 70 км/ч, м/с ²
1	Загруженность состава	расчетная	248,9	0,7564
		+ 25%	251,5	0,7542
		+ 50%	254,2	0,7520
		– 25%	246,3	0,7585
		– 50%	243,7	0,7607
2	Сила тяги	расчетная	248,9	0,7564
		+ 5%	228,2	0,7949
		– 2%	258,4	0,7409
		– 5%	274,5	0,7178
3	Составляющая при V^2 уд. сопротив. движения W_0	расчетная	248,9	0,7564
		+ 2%	251,9	0,7563
		– 2%	246,0	0,7565
		– 5%	241,9	0,7566
		– 10%	235,6	0,7569

Влияние момента сопротивления в зависимости от скорости движения моделировалось путем изменения составляющей удельного сопротивления, зависящей от квадрата скорости. Эта составляющая характеризует аэродинамические характеристики электропоезда, которые можно улучшить конструктивными изменениями кузова.

В процессе исследований предполагали, что разгон проводится на горизонтальном участке пути, т.е. коэффициент уклона равен единице, и при отсутствии буксования колесных пар электропоезда. Приведенные процессы соответствуют расчетным значениям параметров электропоезда. Возможные отклонения параметров от расчетных и результаты исследований для одного из вариантов приведены в табл.2.

В табл.2 приведены результаты исследований динамики 8-вагонного электропоезда в процессе разгона до скорости 200 км/ч при условии питания электропередачи электропоезда от контактной сети. При этом передаточное число редуктора ($\mu = 2,26$), максимальная мощность двигателя – 270 кВт, число тяговых двигателей равно 20 ($n=20$).

На рис.6 приведена зависимость изменения скорости движения от времени. Приведенные процессы соответствуют требуемым значениям параметров электропоезда.

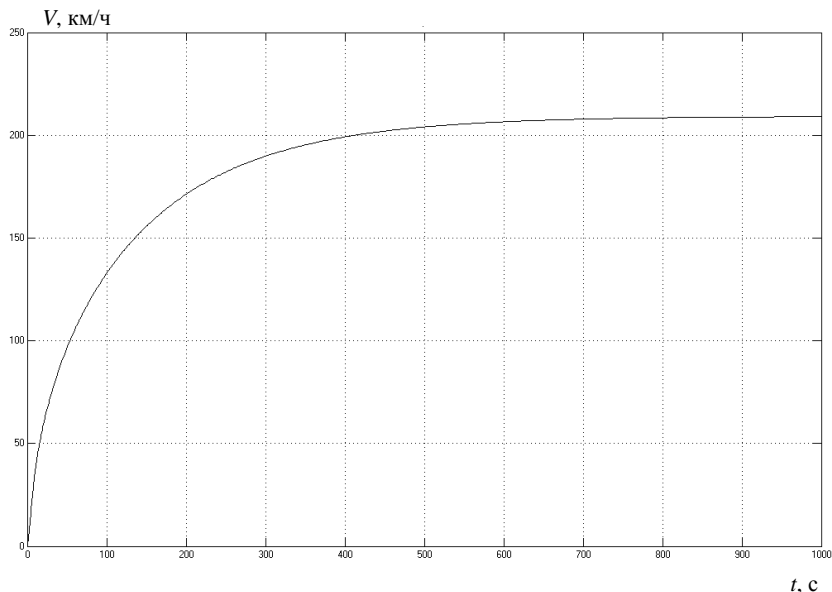


Рис.6 – Зависимость скорости от времени ($n = 16$; $\mu = 2,82$; $P_{\text{дв}} = 270$ кВт)

В результате выполненных исследований установлены технические требования к выбору параметров электропривода, характеристикам тяговых двигателей, силовому агрегату, элементам механической части электропривода (редуктора).

Исследования, проведенные с помощью моделей электропередач 8-вагонного электропоезда, позволили установить следующее:

1) для создания скоростного электропоезда с учетом обеспечения максимальной скорости до 160 км/ч и заданным средним ускорением до 70 км/ч не менее $0,7 \text{ м/с}^2$, требуется электродвигатель с мощностью 270 кВт при использовании редуктора с передаточным числом равным 2,82 и отношением сила тяги к массе состава, равной 8,47 Вт/кг. При этом общее количество электродвигателей равно 16;

2) для создания скоростного электропоезда с учетом обеспечения максимальной скорости до 200 км/ч и заданным средним ускорением до 70 км/ч не ниже $0,7 \text{ м/с}^2$, требуется электродвигатель с мощностью 270 кВт при использовании редуктора с передаточным числом равным 2,26 и отношением сила тяги к массе состава, равной 10,6 Вт/кг. При этом общее количество двигателей равно 20.

В зависимости от технических требований данные результаты исследований позволяют осуществить выбор силового агрегата, структу-

ру электропередачи, определить параметры тяговых электродвигателей и их количество при проектировании скоростных электропоездов.

1. Носков В.И., Марченко В.С., Михневич Г.А. и др. Перспективы и проблемы внедрения асинхронного электропривода на тепловозах. // Сб. науч. трудов НИИ завода "Электротяжмаш" и МЭТП. Вып. 1. – 1989. – С.40-44.
2. Степанов А.Д. и др. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. – М.: Транспорт, 1982. – 254 с.
3. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
4. Носков В.И., Шпика Н.И., Яровой Г.И. О создании тяговых асинхронных электроприводов в НПО "Электротяжмаш" // Новини енергетики. – 2001. – № 9. – С.86-88.
5. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
6. Даниленко А.Ф., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И. Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов // Электронное моделирование. – 1991. – Т.13, №2. – С.40-44.
7. Эволюционные методы компьютерного моделирования / Верлань А.Ф., Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И., Шорох В.А. – К.: Наукова думка, 1992. – 256 с.
8. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ „Транспорт Украины”, 2003 – 248 с.

Получено 16.08.2007

УДК 620.97

В.П.АНДРЕЙЧЕНКО, Ю.П.КОЛОНТАЕВСКИЙ,
В.Н.ФАТЕЕВ, кандидаты техн. наук, Н.П.ЛУКАШОВА
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

Рассматривается применение импульсных конденсаторов сверхвысокой энергоемкости для обеспечения повышения эффективности использования электроэнергии на городском электротранспорте.

В настоящее время для питания вспомогательных цепей подвижного состава городского электротранспорта используются щелочные аккумуляторные батареи (АБ), как правило, с номинальным напряжением 24 В. Для постоянного подзаряда АБ применяют машинные либо статические преобразователи, мощностью 2-3 кВт, причем преобразователи подключены к контактной сети на протяжении всего периода работы подвижного состава. При этом расход электроэнергии на вспомогательные нужды может составлять до 10% от общего потребления электроподвижным составом [1-2].

Известно, что постоянный заряд АБ при неизменном напряжении